面向盲人阅读的触觉交互服务框架构建与应用研究*

祁彬斌　胡玉宁　朱学芳　朱庆华
南京大学信息管理学院　南京 210023

摘要：［目的/意义］在全民阅读的推广过程中，满足视障人群的阅读需求、保证其阅读权益具备重要的社会意义。针对网络时代人们的阅读习惯和兴趣从传统的文本向文字、图像和图形等多元化进行拓展的发展趋势，通过对盲人阅读和力触觉自然交互的相关问题进行探讨，提出一种面向盲人阅读的触觉交互服务框架。［方法/过程］盲人阅读的触觉交互服务框架在对触觉认知规律、感知特性进行分析的基础上，重点阐述触觉对象建构、触觉智能交互和触觉信息呈现等盲人阅读中的关键技术。引入典型的笔式触觉再现设备构建面向盲人阅读的触觉交互服务的实验平台，分阶段对信息资源触觉阅读的有效性和不同层级信息资源的可理解性进行实验。［结果/结论］实验结果表明，该平台在信息资源的盲人阅读方面拥有良好的沉浸感、交互性和可行性；同时验证不同层级的信息资源在触觉阅读和理解的难度上存在着差异，而干预训练的合理引入可有效提升操作者对信息资源的感知和识别能力。

关键词：数字信息资源　盲人阅读　力触觉交互　触觉对象建构　干预训练
分类号：G202　G250.7
DOI：10.13266/j.issn.0252-3116.2019.14.003

1 引言

阅读作为人类获取、传播、共享知识的重要方式，对一个国家和民族的素养提升、文明传承具有重要作用。近年来，全民阅读活动日益受到党和国家的高度重视，2012年11月，党的十八大报告提出“开展全民阅读活动”；2014年以来，国务院连续4年把“倡导全民阅读”写入政府工作报告；国家的“十三五规划”更是将全民阅读提升至国家战略高度。从阅读的主体来看，全民阅读是全社会成员的阅读，因此，在阅读的具体措施和服务上，不仅需要考虑不同年龄阶段读者的阅读需求，而且还应兼顾不同人群阅读能力的差异[1]。第二次全国残疾人抽样调查报告显示，当前我国残疾人的数目为8 296万，其中视力障碍者为1 691万，约占残疾人总数的1/5。因此，如何在全民阅读的推广中满足视障人群的阅读需求、保障其阅读权益，具有很重要的社会意义和应用价值。

在阅读过程中，人们主要通过视觉来获取外部的文字、图像和图形等信息。对视障人士而言，由于视觉受损，需要借助自身的其它感知能力来补偿受损的视觉能力。当前主流的补偿方法分为听觉和触觉两种，前者将视觉信号转换为音频信号，通过文本朗读的方式进行信息的传递；后者则是将视觉信号转换为触觉信号，用户借助于力触觉真实地感知图文信息。触觉方式一般是指将传统文字翻译为专为盲人设计的凸点盲文以便于盲人感知，该方式是现阶段最基本的阅读方式。然而在实际应用的过程中，该方式容易受到盲文普及率、盲文读物数量以及阅读速度等问题的限制。相比于触觉方式，听觉方式适合于无听觉障碍的视障人士，使用者无需进行专业训练，使用的方式简单、灵活，因此更易于被视障人士理解和接受；此外，在读物资源和阅读速度等方面，该方式也拥有着一定的优势。而面对图像、图形等信息资源的阅读和认知，现有的补偿方式无论是听觉还是触觉都未能很好地解决这一问题。

* 本文系国家社会科学基金重大项目“图书、博物、档案数字化服务融合研究”（项目编号：10&ZD134）和国家社会科学基金重大项目“面向大数据的数字图书馆移动视觉搜索机制及应用研究”（项目编号：15&ZD126）研究成果之一。
作者简介：祁彬斌（ORCID：0000-0002-4001-5712），博士研究生；胡玉宁（ORCID：0000-0002-2039-5420），博士研究生；朱学芳（ORCID：0000-0002-8244-5999），教授，博士，博士生导师，通讯作者，E-mail：xfzhu@nju.edu.cn；朱庆华（ORCID：0000-0002-4879-399X），教授，博士，博士生导师。
收稿日期：2018-12-05　修回日期：2019-02-22　本文起止页码：20-29　本文责任编辑：徐健

随着数字媒体技术的发展和计算机通讯网络的应用普及,图像作为重要的信息载体,在知识和信息传播中的作用更加凸显。与此同时,人们的阅读习惯和兴趣逐步发生转变,开始从传统的文本形式向文字、图像和图形等多元化方面发展。针对这一发展趋势,如何借助现代信息技术帮助视障群体有效地认知和学习图像、图形等信息资源就显得尤为重要。

在对盲人阅读和力触觉自然交互的相关研究进行文献回顾的基础上,笔者致力于提出一种面向盲人阅读的触觉交互服务框架。通过对触觉认知规律、感知特性进行分析,重点阐述触觉对象建构、触觉智能交互和触觉信息呈现等盲人阅读中的关键问题。同时通过实验和应用实例实现对文字、图像和图形等信息资源的触觉再现,并对实验的数据进行分析。最后,对本研究存在的问题和后续的研究工作做简要叙述。

2 文献回顾

本节从盲人阅读与力触觉自然交互两个方面,对与本文密切相关的研究作简要回顾。

2.1 盲人阅读

随着社会的发展和科技的进步,特殊群体尤其是视障人士的阅读问题越来越引起人们的关注。研究者从不同的视角对盲人阅读开展相关研究工作。林英以视力障碍者为调查对象,通过问卷的方式了解该人群的阅读现状,及其在阅读方面获取的社会支持情况[2]。在后续研究中,其进一步归纳了视障人士阅读的3种主要方式:触觉阅读、视觉阅读和听觉阅读,并对不同阅读方式所适用的人群进行具体的分析[3]。李肖则从阅读资源的状况出发,分析了目前我国盲人阅读资源建设现状,并对建设中亟待解决的问题进行阐述[4]。由于公共图书馆是视障人群获取信息的重要来源,部分学者着眼于公共图书馆对盲人阅读进行研究。张靖等人在梳理和分析加拿大公共图书馆残障用户服务时,着重从特殊馆藏、辅助设备、馆员服务等多个角度对视障人群的阅读服务情况进行了关注[5]。王林军通过分析俄罗斯盲人图书馆的宣传活动,为我国公共图书馆视障阅读服务工作提供相应的借鉴和参考[6]。陈艳伟从国内视障读者数字阅读的角度,分析国内公共图书馆数字视障服务的现状和存在的问题,并从多方面给出数字视障服务的改进策略[7]。袁丽华以视障读者的满意度作为衡量图书馆无障碍阅读服务质量的重要标准,从视障读者的角度对无障碍阅读活动的效果进行了评估分析[8]。数字网络和信息技术为盲人阅读提供了新的发展机遇,相关研究工作获得进一步推进。张冰梅等人通过问卷的方式对视障读者阅读的时间、途径和需求进行调研,显示视障读者逐步实现从传统的盲文纸质阅读向全媒体阅读的转变趋势,并在此基础上,探讨了公共图书馆改善视障读者无障碍服务的应对策略[9]。

同时,部分研究者也从盲人阅读的辅助设备出发开展研究,阅读辅助设备主要分为电子盲文点显器[10]和电子触觉图像显示器[11]。前者用于将普通文字动态显示成盲文,以便为盲人提供良好的文本阅读体验;后者通过将视觉中像素替换成触点的方式,实现图像、图形等信息的呈现。考虑到电子触觉图像显示器中图像展示仍然是以传统视觉认知的方式表达,与盲人通过手指触摸和理解图像的方式本质上有所不同,因此,清华大学的研究团队[12]从用户体验的角度,总结和提出了盲人触觉图像的设计准则,以便在阅读过程中有效提升盲人获取信息的效率。

2.2 力触觉(自然)交互

近年来,伴随着新型交互设备不断涌现,人与信息空间的联接朝着更加自然、便捷和高效的方向进行演进。交互界面也经历着从人适应机器到机器不断适应人的发展变迁,以"人为中心"的自然用户界面正成为未来人机交互发展的主要方向。与语音交互、视觉交互相似,力触觉交互作为一种新型的自然交互方式,在人们信息交流和沟通中的作用日益显著。借助相应的力触觉设备[13-14],人们可以脱离复杂深奥的图形用户界面限制,越过繁琐的菜单和参数选择,以自由、真实的方式触摸、操纵和感知虚拟场景中事物,从而获取良好的逼真感和沉浸感。依据人体感受器的差异,人的力触觉具体可分为皮肤感受的触感和关节韧带感受的力感[15],通常情况下这两种感觉相互交织,表现出交融呈现的情形。机器为了模拟这两种感受,则形成了触觉感知(tactile perception)和力反馈(force feedback)技术。前者主要是通过物体表面的振动、纹理和温度来识别触摸的对象,后者则是通过重量、硬度和摩擦力等因素对接触对象进行判别[16]。

经过几十年来的努力,触觉交互在硬件和算法层面都取得了长足进步。在硬件层面,各种类型的触觉交互设备不断涌现,从早期面向桌面和Web体验的力反馈鼠标到现今适用于三维空间和VR情境的手指套环、触觉手套等[17-18],小型化、自然性、穿戴式和柔性化正逐步成为触觉交互设备发展的主要趋势。在算法层面,Phantom力触觉设备的问世掀起了力触觉生成方

法的研究热潮,典型算法包括 God-object[19]、Virtual proxy[20]等,这些算法的提出使指尖与各种物体间虚拟交互成为可能,并带给人们前所未有的精确、便捷的触觉激励。在近十几年,力触觉交互开始与具体的应用领域相结合,呈现出由科学专业领域向日常生活进行扩散的趋势。在服务于视障人群方面,最为典型的应用是触觉导航,国外的 J. Borenstein 等[21]为视障人士开发了一款名为 GuideCane 的导航系统,其以导盲杖为原型,通过超声波检测周边的障碍物体,并利用与距离成反比的振动反馈为用户提供导航信息。O. Lahav 等[22]则在盲人定向行走技能学习和虚拟训练中引入触觉反馈,研究表明该方法可帮助盲人构建有效的认知地图(Cognitive Mapping),提升其对未知空间的认知和探索能力。针对博物馆中资源和服务的可访问性问题,C H. Park 等[23]则利用触觉交互,并结合深度相机和远程机器人,构建起基于触觉界面的远程博物馆访问系统,使视障用户能够借助触觉形式远程实现对博物馆场景的探索和 3D 展品的触觉感知。在抽象概念方面,力触觉再现被引入到科学概念和抽象几何信息的学习过程中,用于帮助人们更好地理解基础知识,使学习充满趣味和交互性,主要研究包括:H. N. Kim 和 I. Han 等[24-25]通过触觉方式为视觉障碍的学生进行热、温度、力等物理学相关科学概念呈现等。与非触觉仿真相比,融入力触觉的多模态呈现环境可给用户有效地提供感性经验,实现知识的有效传递。

文献综述表明,以往盲人阅读服务方面的研究主要关注于现状、问题和措施等理论层面的探讨,然而,尚未从应用层面开展相关研究工作。另外,力触觉交互技术方面的理论和算法基本成熟,并逐步与具体的应用领域相结合。笔者认为新型自然人机交互的发展和成熟可为盲人阅读的研究工作提供新的研究视角和思路,笔者拟将盲人阅读和力触觉自然交互技术相结合,从应用的角度对研究工作进行探讨。

3 触觉交互服务框架

笔者通过将力触觉(自然)交互技术引入盲人阅读领域,提出一种面向视障人士阅读的触觉交互服务框架(见图 1)。所构建的触觉交互服务框架细分为 5 个部分:数据资源层、操作处理层、智能交互层、交互设备层和应用服务层。

数据资源层是服务框架中上面 4 层的基础,为上层计算提供了所需的数据支持,它主要分为文档、图像、图形等数字资源和实时采集的用户动作行为数据,

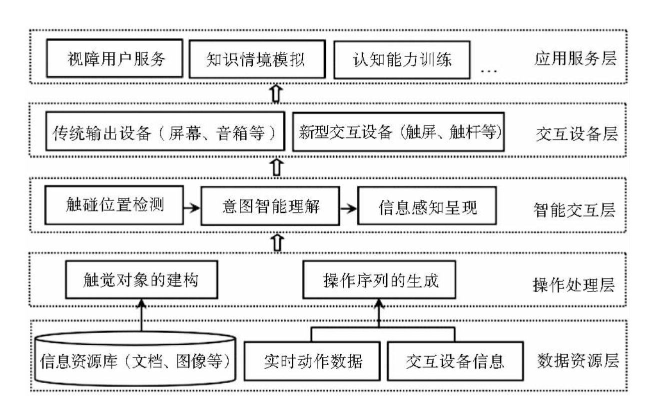


图 1 面向盲人阅读的触觉交互服务框架

交互设备的信息则与应用场景中设备选取情况密切相关。操作处理层是负责将信息资源库中的数字资源构建成语义明确、便于理解的触觉对象,同时提取交互行为数据的特征,并结合交互设备信息生成操作序列。智能交互层是框架的核心部分,主要负责操作序列与触觉对象间的交互以及用户意图的感知识别,触碰检测的引入使用户能真实地触摸和感知对象的表面和相应特征,实现触觉交互和信息交流。交互设备层主要是将计算得到的触觉信息进行触觉渲染,通过力感或触感的形式传递给操作者;该层中视听觉辅助信息的呈现可在监督盲人的阅读过程、优化和提升认知阅读效果的同时,被用作帮助具有残余视力的视障人士进行触觉认知。以盲人感知螺纹木质球为例,触觉交互服务的基本流程是:首先,将数字资源通过转换机制处理成触觉对象,分别提取出轮廓特征——球形、材质特征——木质、纹理特征——螺旋等;其次,视障人士的手部运动状态通过运动映射算法转化为用户隐喻(如 3D 光标、虚拟手等);然后,在虚拟环境中用户隐喻和触觉对象之间触碰状态与区域等信息能被实时捕获,阅读过程中根据指尖或用户隐喻触碰的轮廓、材质和纹理特征计算出触感和受力情况;最后,分析得到的力触觉信息经由触觉交互设备作用于指尖或手部位置进行合理化呈现。应用服务层是依托前面 4 层进行构建并开展服务,其既包括满足视障用户功能型需求的服务,又涉及到知识情境模拟、认知能力训练等新型的服务形式,可满足用户不同层级的阅读需求。服务框架的 5 个层级之间层层递进,互为补充,可提供给视障用户自然、高效和智能的触觉交互服务体验。

在下文中,笔者将对中间 3 层的核心内容进行详细描述,3.1 节主要描述的是操作处理层中触觉对象的建构;考虑到智能交互层中叙述篇幅较大以及信息感知呈现与交互设备层的内在关联,因此,3.2 节触觉

智能交互主要涉及图1中的触碰位置检测和意图智能理解，信息感知呈现则与交互设备层的相关内容构成3.3节触觉信息呈现。为了保证实际触觉阅读中的效果，在3.4节介绍干预训练机制，以保证用户现有知识结构和触觉感知对象之间的合理映射。

3.1 触觉对象的建构

考虑到人的生理学特性和触觉感知特点[26-27]，如何从触觉认知角度构建语义明确、便于理解的触觉对象就显得尤为重要。触觉对象主要分为文字、图像和图形3类，它的认知过程应遵循由浅入深、逐步递进的原则。就文字而言，视障人士认知的文字主要是盲文（也被称之为点字或凸字），是一种专为盲人设计、靠触觉感知的文字。盲文点字一般由6个点组成，呈3行2列的排布方式，左侧从上到下1、2、3，右侧从上到下4、5、6，每个盲文点字称之为一方。研究发现，我国当前普通话使用的盲文分为现行和双拼两种，两者都属于拼音制[28]。盲文的组成以方为单位，一个汉字由若干方组合完成。盲文出版的困境[29]和盲人群体较低的认字现状揭示了提供一种数字化的触觉认字和阅读方案的重要性。笔者对视障人群的盲文阅读现状和问题进行调研访谈，获得如下启示：在盲文的触觉构建过程中，触觉感知的方式、点距、方距以及分词等因素应进行特殊考虑，相关参数应可根据读者阅读特点和认知习惯进行个性化调整。同时在具体的学习和阅读过程中，应首先提供对汉字盲文中声母、介母和韵母的学习和认知，然后逐步深入实现字、词、句和篇的递进式的知识建构，相关经验可为图像、图形等信息资源的触觉建构提供参考。

图像是触觉对象中最为关键的一环，它的存在有助于人们构建一种形象的思维模式，便于人们学习和思考问题。而图形通常被理解是简单凸起形状的二维呈现，相比于包含丰富细节信息的图像，图形的触觉构建较为简单，涉及的主要是形状轮廓特征，因此笔者拟将这两者放于一起进行探讨。常用的图像特征包括轮廓形状特征、材质特征、纹理特征、颜色特征以及空间关系特征5类，笔者按照由简单到复杂，从整体到局部的方式对这些特征划分层级。在具体的阅读过程中，视障人士可从低层级出发进行感知，并根据自身需求自主选择更高层级的内容，划分的具体方式为：轮廓形状特征、材质特征为第一层，纹理特征、颜色特征为第二层，空间关系特征则位于最高层。轮廓形状主要是用来描述形状的总体特征[30]，材质则体现为接触物表面的粗糙度、硬度和温度等信息[31]，这两者可让阅读者对图像有一个直观、全局的初步认识。图像纹理为图像的某种局部性质，或是对图像局部区域中像素之间关系的一种度量[32]。在计算机图形学中，图像纹理主要涉及两方面的内容：物体表面凹凸不平的沟纹以及光滑表面的彩色图案。笔者主要关注前者，彩色图案和颜色特征具有共通之处，因此放在颜色特征中进行统一讨论。我们知道图像是真实世界中三维物体在二维平面上的投影，其本身并不具有高度信息。因而，在图像纹理触觉呈现的时候，应考虑为其恢复合适的高度信息，以保证凸凹感在触觉上的合理呈现。

依据相关人士的函询记录和阅读的参考文献，笔者发现对视障人士（尤其是全盲人士）而言，颜色特征几乎是一种不能被理解和感知的特征；而视障人士由于长期视觉缺失的缘故，部分人的空间思维能力相对较差。对于前者，需要时可借鉴文献[33]的研究思路，构建颜色和空间感的心理学效应，研究表明：心理学效应会受到人的主观条件和个性因素的影响，但共同的生活条件和社会环境促使共性的心理认知的形成。如暖色调拥有扩散效应，给人以前进、凸起、靠近的感觉；而冷色调则与之相反，给人的感觉表现为后退、凹进、远离。从这个角度来看，可在阅读的过程中提供给阅读者不同的空间距离感，实现空间感到颜色的反向映射。上述两者用户可根据个人需要自主选择，便于加深对细节的理解。为了避免在图像阅读的初期给用户造成过多干扰，本文的实验环节主要关注前面3类特征，对后两类暂不进行验证。

3.2 触觉智能交互

在建构好触觉对象之后，人们期望在各类交互情境中实现与触觉对象的信息对话。在此过程中，如何精准地检测交互的位置、如何让机器智能地理解人类的意图、如何对用户的交互给出自然真实的体验是我们想要探究和解决的问题。

依据交互情境的差异，与触觉对象的交互可从二维平面和三维空间两个层面进行讨论。典型的平面交互情境是配备触摸屏的移动终端，移动终端现已在音频和视觉交互方面取得显著进步，可提供给人们极为丰富、多样的视听觉信息。但在触觉交互方面，任何信息在触摸屏上的呈现都是简单、单调的（玻璃）质感，信息资源在触觉上的表达方式极为有限甚至匮乏，很难满足视障群体在新的历史时期通过触觉进行阅读、获取信息的渴望。面对这样的痛点，研究者采用的总体思路是通过定量的转换模型将视觉信息转为触觉信息，并在指尖实现触觉呈现，具体的解决方案可分为两

类:①从触摸屏本身出发,在现有触摸屏结构中添加触觉再现面板层,用于产生静电力触觉刺激[34];②设计面向移动终端的可穿戴式的触觉再现设备[35]。分析现有的研究成果,笔者认为后者是现阶段或未来短期内有可能落地的方案,基本流程是用户的手指末端直接与触摸屏进行交互,根据触摸位置获取目标像素点,通过图像处理算法解算出对应像素点的特征信息,最后依据这些信息驱动触觉交互设备的执行单元产生可控的力触觉交互效果。而在 VR 为代表的三维情境下,触觉交互是借助交互设备(3D 鼠标、触觉手套)通过用户隐喻(3D 光标、虚拟手等)对虚拟对象进行操作的拟实交互。与平面交互情境不同,在三维虚拟空间中,同一时刻两个甚至多个对象之间有可能出现空间位置上的重叠,此时就需用碰撞检测算法[36]来判断用户隐喻和触觉对象间是否发生接触。为了有效提高算法的效率,检测过程应分为两个阶段:粗粒度检测和细粒度检测。在粗粒度检测阶段,应快速剔除确定不会发生触碰的触觉对象,以达到初步过滤的效果;对阅读过程中可能发生触碰的物体,则需要进一步进行细粒度的检测,获取触碰发生的时刻和对象的表面位置。最后,当触碰或交互发生时算法输出必要的力触觉信息,从而保证整个三维情境触觉阅读过程的真实感和沉浸感。此外,平面交互情境下在跟踪屏幕上的交互点的基础上,对手指的姿势、按压力等主动交互信息应着重进行考虑;三维空间情境下在触碰和抚摸图像、图形等信息资源的基础上,从选择(选取、缩放等操作)与操纵(抓取、平移和旋转等)两个层面[37]实现视障人士与触觉对象多样化的交互操作也尤为重要。

传统的交互系统以机器为中心,用户意图的表达依赖于系统命令的执行,总体的交互过程中人的认知和操作负荷较重,交互效率有待提高。在触觉交互服务中,我们期望视障人士能逐步摆脱以机器为中心的束缚,在阅读过程中能集中精力于信息资源本身,依托力触感实现“人为中心”的交互阅读方式[38]。因此,通过借鉴人机交互领域的最新思想,尝试将“智能”引入至触觉交互,以使机器(系统)的认知能力得到提升。基本思路是在分析和抽取用户操作基本特征的基础上,构建理解用户意图的算法,并结合上下文知识推理特定情境下用户的交互意图。相关研究[39]也表明采用意图驱动的系统能较好地提升交互自然性和交互效率,有效地降低用户的操作负担和认知负担。

3.3 触觉信息呈现

触觉信息呈现是触觉交互服务的基础性工作,若没有力触感,视障人士将无法有效感知图像、图形等信息资源。具体而言,其可分为力触觉计算和力触觉再现两部分内容,力触觉计算是指根据阅读过程中指尖或用户隐喻的运动对触感和受力情况进行分析,力触觉再现则借助触觉交互设备对力触觉信息进行合理化呈现。

当前,在触觉感知技术中有关温度和振动此类信息的模拟已较为成熟。以振动触觉反馈为例,通过设定不同的频率和振幅可提供多样化的触感信号,其已被广泛应用于盲杖导航、智能手机和 VR 手柄之中。但当面对图像、图形等信息资源的触摸和感知时,振动反馈的方式很难满足人们在操作过程中对于高精度、细腻性和沉浸式的认知需求。因此,对于图像、图形等信息资源的判别,应选取力觉反馈作为基本感知方式,振动反馈等则作为辅助提醒手段。当接触到触觉对象的轮廓形状或对触觉对象进行操作时,应能让用户感受到触感,即提供必要的反作用力。触觉对象表面材质的刻画应从硬度和粗糙度两个层面进行考虑,软硬程度是通过反馈力的大小进行调节,粗糙度则可通过添加与运动方向相反的摩擦力进行模拟。触觉对象的沟纹特征是在恢复触摸区域表面高度值的基础上,依据梯度表面对力触觉信号进行修正从而产生触觉上凹凸感。有关力触觉计算方面的详细信息,请参见前期的研究成果[40]。

在力触觉计算的基础上,现有触觉再现的基本模式分为主动和被动两类。其中,被动模式是指受到环境因素或牵引力等影响下系统自动响应过程,一般与用户隐喻是否接触对象无关。主动模式是指接触触觉对象的情况下,操作者主动地进行探索和感知。笔者认为盲人阅读触觉过程中应采用被动响应和主动感知相互结合的方式作为基本框架。就具体的呈现装置而言,指戴式、穿戴式或者笔式触觉再现设备等都可作为力觉或触觉信息合理化呈现的接口,在实践过程中用户可根据自己的需求和条件进行自主选择。

3.4 干预训练机制

对于视障人士而言,文字、图像和图形等信息的获取大多通过手指触摸的方式来完成,这与常人使用眼睛了解外部世界有所不同。在实际触觉阅读的过程中,研究者发现视障人士的触觉阅读效果会受到自身现有的知识结构、触摸行为偏好以及所构建的触觉对象等因素的影响。因而在阅读过程中保证用户现有知识结构和所感知对象之间的合理映射就显得极为重要,其将对阅读效果的好坏起到很大的影响。研究表

明干预训练对于人们掌握知识、理解概念有着显著影响[41]，因此，当视障人士遭遇到在其现有知识结构下感知到的触觉对象无法被有效认知时，干预训练的合理引入为解决此问题提供了很好的思路，图2为笔者提出的干预训练机制的流程图。在具体的触觉阅读过程中，可能会出现以下3种情形：① 触觉感知的结果与视障人士的现有知识结构出现偏差或混淆的情况，此时干预训练机制需对受训者进行干预训练，以纠正阅读过程中的认知误差，实现对象认知的合理匹配；② 当视障人士对触觉对象进行触觉感知后，若此时其脑海中并未出现对应对象的相关概念，则须对相关概念进行学习和建构，从而实现对象的有效认知；③当现有的知识结构和对象的触觉感知基本一致，此时对象的认知过程无需进行特殊干预。此外，干预训练机制还应提供相应的反馈功能，该功能可在阅读的实践中进一步完善和丰富阅读者的知识结构，提高对所感知触觉对象的认知效率。

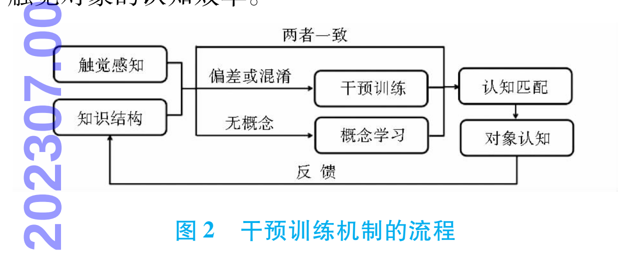


图2　干预训练机制的流程

4　实验与讨论

为了验证面向盲人阅读的触觉交互服务框架可行性，分析信息资源在触觉阅读与理解上的表现情况，本节设计开发出面向盲人阅读的触觉交互实验平台，可参见图3，引入笔式触觉再现设备进行触觉信息再现，并在实验过程中对视觉辅助信息实现同步地呈现。

34名被试者是在南京大学招募的师生，男女性别比1∶1，年龄区间为20－35岁，以消除因性别和年龄对实验效果产生的影响。在实验开始前调查结果可知：被试者既无触觉训练背景，也没有触觉交互设备的使用经历。实验过程分为两个阶段：第一阶段挑选志愿者对触觉阅读的交互平台的体验效果进行评估；第二阶段则邀请被试者分步骤完成该平台下不同层次信息资源可理解性的实验，可理解性主要是指信息资源的(触)知觉理解，即借助于已有知识经验对当前感知对象的意义做出解释，并用词把它表示出来。

4.1　实验方法

笔者通过让志愿者或被试者佩戴眼罩来排除视觉因素对触觉感知的影响。在实验的过程中，操作者利

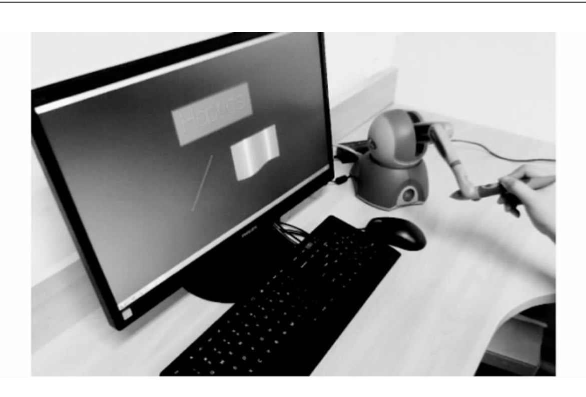


图3　面向盲人阅读的触觉交互服务的实验平台

用笔式触觉再现设备的笔杆控制虚拟空间的操作隐喻(本实验中为3D小球)对各类信息资源进行“摸索”。实验结束后，对于第一阶段的实验，笔者通过问卷的方式对操作者的阅读体验进行收集；对于第二阶段的实验，笔者则对操作者每个步骤的感知正确率进行统计，打分采用10分制，每成功匹配一个记2分，否则记0分。最后，通过访谈的方式与受试者交流实验感受并进行记录。

4.1.1　触觉阅读的有效性实验　在实验中，首先让志愿者戴上眼罩，以避免视觉对触觉阅读的影响。其次，在具体感知的过程中，不进行任何训练和口头指导的情形下，志愿者自主地对虚拟环境中的信息资源进行3－5分钟的探索和感知。实验结束后，志愿者完成问卷的填写，填写的内容主要分为两部分：一是志愿者年龄、性别等背景信息的收集；二是触觉阅读效果的调查，主要涉及的因素包括触觉对象的感觉、对象的细节辨认、触觉探索的有趣性、深入探索的意愿以及触觉交互的友好性等。

4.1.2　信息资源可理解性实验　邀请34名被试者参与实验，在实验开始前，对被试者进行简单的触觉交互训练，并对实验内容进行简要说明。整个实验过程分成轮廓形状感知、材质感知和纹理感知3个不同层级，被试者在蒙眼的情形下，首先依据自身现有知识经验对不同层级的触觉对象进行探索。当被试者对触觉对象无法进行有效认知的时候，引入干预训练机制，并进行第二轮触觉对象的探索。实验结束后，对两轮触觉对象的识别正确率分别进行统计和分析。

轮廓形状感知：通过触觉方式阅读虚拟空间中的5种轮廓形状，分别是半圆形、矩形、三角形、梯形和五边形(见图4)，整个实验过程持续5分钟。实验结束后，被试者依据感知体验对相应的轮廓形状进行匹配，并对匹配的成功率进行分析。

材质感知：被试者对虚拟空间中5种不同的材质

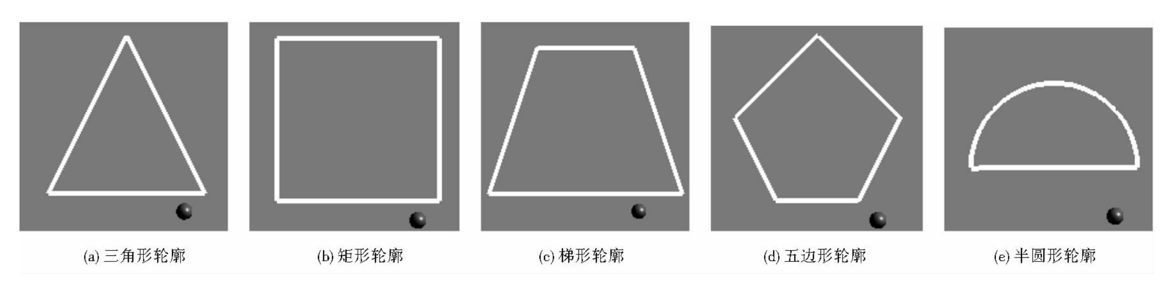


图4 图像信息资源的轮廓形状情况

（主要是对象的硬度、摩擦信息）进行感知，实验过程持续5分钟（见表1）。实验结束后，被试者依据感知体验选择相应材质的对应编号，同时对匹配的成功率进行分析。

纹理感知：被试者对触觉图像的纹理信息（主要是表面的沟纹信息）进行感知，笔者选取5种不同的纹理图像进行实验（见图5），实验过程持续5分钟。实验结束后，被试者依据感知体验选取图像纹理的对应编号，并对匹配成功率进行分析。

表1 图像信息资源的材质情况

材质类别	硬度	摩擦力
材质1	适中	适中
材质2	较大	适中
材质3	较小	适中
材质4	适中	较大
材质5	适中	较小

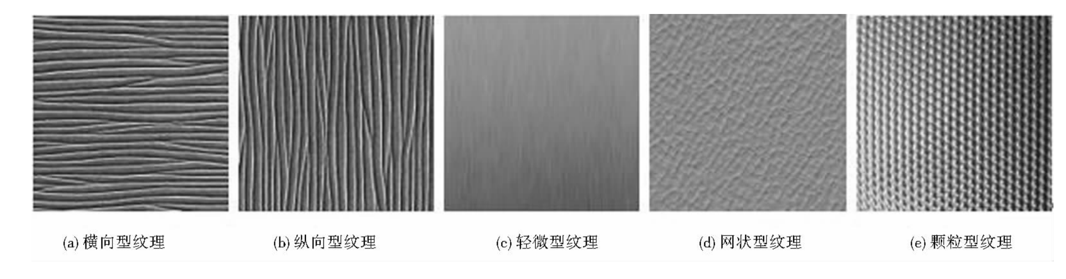


图5 图像信息资源的纹理情况

4.2 分析与讨论

触觉阅读的有效性实验结束之后，笔者对志愿者填写的问卷进行统计，从而完成对图像等信息资源阅读效果的调查和分析，表2所示为触觉交互平台下信息资源的阅读有效性评价。调查结果表明：本文的实验系统能使用户感觉到触觉对象、满足用户对细节的辨认需求，并认为其有助于实现对图片等信息资源的触觉探索。在满足用户的好奇心以及展示方式有趣性方面，用户的认可度较高；但在人机交互体验方面，认为体验较好的比例不到80%，总体的认可度最低。实验结束后，通过对用户进行访谈发现，笔式触觉交互方式虽然可以实现触觉信息的呈现，但人机交互的自然性距离人们的期望尚有一定的距离，实践中在条件允许的情况下应选用自然性更优的触觉交互设备，如手指套环、触觉手套等。

表2 触觉交互平台下信息资源的阅读有效性评价

信息资源的阅读有效性评价	人数（共34人）
可感觉到触觉对象	33
可感觉到触觉对象的形状	32
可感觉到触觉对象的软硬	32
可感觉到触觉对象的纹理	34
有助于探索图片等信息资源	32
对体验充满好奇和兴趣	34
人机交互体验较好	27

表3是触觉交互平台下信息资源可理解性实验的样本统计量。通过干预训练前信息资源的感知正确的均值数据可以看出，轮廓形状、材质和纹理三者的均值得分依次下降，其说明不同层级的信息资源在触觉阅读和理解的难度上存在着差异，用户对于信息资源轮廓形状特征的理解难度较低，对于纹理特征的理解难度相对较高；同时，也验证了前文中触觉对象建构时依据不同特征的理解难度实现层级划分的合理性。

表4是对不同层级信息资源的可理解性进行的配对T体验，对轮廓形状阅读和纹理阅读效果进行显著性差异判断时(34) = 8.212，$p = 0.00$，就该结果而言，轮廓形状特征和纹理特征在用户阅读效果上具有显著差异；对材质阅读和纹理阅读效果进行显著性差异判断时(34) = 4.164，$p = 0.00$，结果显示材质特征和纹理特征在用户阅读效果上也具有显著差异；最后，对轮廓

表 3 触觉交互平台下信息资源可理解性实验的样本统计量

实验样本	均值 M	N	标准差 SD	均值的标准误差
轮廓训前	7.59	34	2.190	0.376
材质训前	6.88	34	3.236	0.555
纹理训前	4.00	34	2.256	0.387
轮廓训后	8.94	34	1.722	0.295
材质训后	9.35	34	1.276	0.219
纹理训后	8.35	34	2.281	0.391

形状阅读和材质阅读效果进行显著性差异判断，结果表明(34) = 1.089，p = 0.284 > 0.05，轮廓形状特征和材质特征在用户阅读效果上不存在显著差异。上述结果也是对触觉对象建构时将轮廓形状特征、材质特征列为第一层，纹理特征列为更高层的合理解释。干预训练的合理引入后，轮廓形状、材质和纹理三者的感知正确的均值数据都得到了较大提升，可参见表 3。结果显示，经过干预训练后，信息资源的材质特征的感知正确率最高，纹理特征总体提升的幅度最大。

表 4 触觉交互平台下不同层级信息资源可理解性的配对 T 检验分析

配对样本	成对差分					t	自由度(df)	统计显著性 Sig.(双侧)
	均值	标准差	均值的标准误差	差分的 95% 置信区间				
				下限	上限			
轮廓训练前 － 材质训练前	0.706	3.778	0.648	－0.612	2.024	1.089	33	0.284
轮廓训练前 － 纹理训练前	3.588	2.548	0.437	2.699	4.477	8.212	33	0.000
材质训练前 － 纹理训练前	2.882	4.036	0.692	1.474	4.291	4.164	33	0.000

表 5 为干预训练前后不同层级信息资源的可理解性进行的配对 T 检验分析，对干预训练前后轮廓形状阅读效果进行显著性差异判断时绝对值(34) = 4.176，p = 0.00，就该结果而言，轮廓形状特征的用户阅读效果在干预训练前后上有着显著差异；对干预训练前后材质的阅读效果进行显著性差异判断时绝对值(34) = 5.250，p = 0.00，结果显示材质特征的用户阅读效果在干预训练前后上有着显著差异；最后，对干预训练前后纹理特征的阅读效果进行显著性差异判断时绝对值(34) = 8.780，p = 0.00，结果表明，纹理特征在用户阅读效果上有着显著差异。当自由度 df = 33，显著水平 α = 0.05 时，临界值(34) = 2.032，而本次 3 组 T 检验的绝对值均大于临界值，即认为干预训练前后的匹配成功率均值存在显著差异。由此可以看出笔者提出的干预训练机制对提升触觉对象的识别正确率具有很显著的效果。

表 5 触觉交互平台下干预训练前后信息资源可理解性的配对 T 检验分析

配对样本	成对差分					t	自由度(df)	统计显著性 Sig.(双侧)
	均值	标准差	均值的标准误差	差分的 95% 置信区间				
				下限	上限			
轮廓训练前 － 轮廓训练后	－1.353	1.889	0.324	－2.012	－0.694	－4.176	33	0.000
材质训练前 － 材质训练后	－2.471	2.744	0.471	－3.428	－1.513	－5.250	33	0.000
纹理训练前 － 纹理训练后	－4.353	2.891	0.496	－5.362	－3.344	－8.780	33	0.000

通过分析讨论可以发现，笔者依据触觉交互服务框架构建的触觉交互实验平台能基本满足用户对触觉对象的感知、探索和阅读需求；轮廓、材质、纹理等不同层级的信息资源在触觉阅读和理解难度方面存在的差异也验证了触觉对象建构时采用特征分类、层级划分思路的合理性；而当感知到的触觉对象无法被用户有效理解和认知时，干预训练机制的引入有效地提升了操作者对信息资源的感知和识别能力，是对视障用户触觉交互阅读服务效果的良好保证。

5 结论与展望

笔者提出一种面向盲人阅读的触觉交互服务框架，通过对触觉认知规律、感知特性进行分析，重点阐述了触觉对象构建、触觉智能交互和触觉信息呈现等盲人阅读中的关键问题，并通过实验对文字、图像和图形等信息资源的触觉再现。实验显示：笔者实现的触觉交互平台在信息资源的盲人阅读方面表现出良好的沉浸感、交互性和可行性；同时验证了不同层级的触觉信息资源在阅读和理解的难易程度上存在着差异。在信息资源的阅读过程中，当触觉对象无法被有效认知时，合理地引入认知训练机制可有效提升操作者对信息资源的感知和识别能力。不足之处在于笔者开展的信息资源的阅读的有效性和可理解性实验是通过用户佩戴眼罩模拟视障群体阅读方式来排除视觉因素对触

觉感知影响的,被试若选择视障群体,实验结果的科学性进一步提升,实验结果才会更有说服力;年龄等因素可能对实验的结论具有一定影响,不同年龄阶段人群的认知能力、触觉力觉控制可能存在差异。

笔者将新型的触觉交互模态融入到盲人阅读,利用感官通道间的增益、互补效果,助力视障用户克服信息资源可感知方面的障碍,较好地提升了数据资源和服务的可访问性,促进了公共文化服务的公平供给。在实践上,探索了三维情境下数据资源的(视听触)多模态呈现和自然交互,构建了较为完备的框架方法体系,研究成果可为图博档等社会文化领域研究和实践活动提供参考借鉴。

后续的研究将主要围绕触觉图像的分层感知算法、多层次交互操作构建以及不同级别(盲、低视力等)、不同致盲原因(先天、后天)和不同年龄阶段(儿童、青年、中老年等)的视障人群触觉阅读的实验对比开展工作,从而实现对盲人触觉阅读和信息资源认知规律的探索。

参考文献:

[1] 夏立新,李成龙,孙晶琼. 多维集成视角下全民阅读评估标准体系的构建[J]. 中国图书馆学报, 2015, 41(6): 13-28.
[2] 林英. 视障者无障碍阅读社会支持系统实证研究——基于112份视障人士的问卷调查分析[J]. 图书情报工作, 2013, 57(24): 84-89.
[3] 林英. 视力障碍人士阅读问题研究[J]. 图书馆理论与实践, 2014 (4): 22-25.
[4] 李肖. 我国盲人阅读资源及阅读推广现状[J]. 新世纪图书馆, 2013 (5): 19-22.
[5] 张靖, 李晗, 林宋珠, 等. 加拿大多伦多公共图书馆残障用户服务研究[J]. 中国图书馆学报, 2013, 39(6): 86-100.
[6] 王林军. 俄罗斯盲人图书馆宣传活动的特点及启示[J]. 图书馆建设, 2013(12): 46-49.
[7] 陈艳伟. 公共图书馆数字视障服务现状调查与对策分析[J]. 图书情报工作, 2013, 57(16): 61-64.
[8] 袁丽华. 面向视障读者的图书馆阅读活动效果评估研究——基于南京市无障碍图书馆的调查分析[J]. 图书馆学研究, 2016(20): 96-100.
[9] 张冰梅, 易红, 刘晓景, 等. 全媒体环境下视障读者的阅读现状及应对策略研究[J]. 图书馆论坛, 2013, 33(6): 127-132.
[10] RUSSOMANNO A, O'MODHRAIN S, GILLESPIE R B, et al. Refreshing refreshable braille displays [J]. IEEE transactions on haptics, 2015, 8(3): 287-297.
[11] VIDAL-VERDU F, HAFEZ M. Graphical tactile displays for visually-impaired people [J]. IEEE transactions on neural systems & rehabilitation engineering, 2007, 15(1): 119-130.
[12] 江宁, 鲁晓波, 李元, 等. 面向盲人的图形显示设计方法及其用户体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(9): 1539-1544.
[13] BUXTON B, HAYWARD V, PEARSON I, et al. Big data: the next Google [J]. Nature, 2008, 455(7299): 8-9.
[14] 宋爱国, 田磊, 倪得晶, 等. 多模态力触觉交互技术及应用[J]. 中国科学:信息科学, 2017, 47(9): 1183-1197.
[15] WANG D, XIAO J, ZHANG Y. Haptic rendering for simulation of fine manipulation [M]. Berlin: Springer, 2014.
[16] KIM S C, ISRAR A, POUPYREV I. Tactile rendering of 3D features on touch surfaces [C]//Proceedings of the 26th annual ACM symposium on user interface software and technology. New York: ACM, 2013: 531-538.
[17] HAN T, ANDERSON F, IRANI P, et al. HydroRing: supporting mixed reality haptics using liquid flow [C]//Proceedings of the 31th annual ACM symposium on user interface software and technology. New York: ACM, 2018: 913-925.
[18] HINCHET R, VECHEV V, SHEA H, et al. DextrES: wearable haptic feedback for grasping in VR via a thin form-factor electrostatic brake [C]//The 31st annual ACM symposium on user interface software and technology. New York: ACM, 2018: 901-912.
[19] ZILLES C B, SALISBURY J K. A constraint-based god-object method for haptic display [C]//Proceedings of 1995 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Human robot interaction and cooperative robots. Pittsburgh: IEEE, 1995, 3: 146-151.
[20] RUSPINI D C, KOLAROV K, KHATIB O. The haptic display of complex graphical environments[C]//Proceedings of the 24th annual conference on computer graphics and interactive techniques. New York: ACM, 1997: 345-352.
[21] BORENSTEIN J, ULRICH I. The GuideCane-a computerized travel aid for the active guidance of blind pedestrians [C]// Proceedings of international conference on robotics and automation. Pittsburgh: IEEE, 1997: 1283-1288.
[22] LAHAV O, MIODUSER D. Haptic-feedback support for cognitive mapping of unknown spaces by people who are blind [J]. International journal of human-computer studies, 2008, 66(1): 23-35.
[23] PARK C H, RYU E S, HOWARD A M. Telerobotic haptic exploration in art galleries and museums for individuals with visual impairments [J]. IEEE transactions on haptics, 2015, 8(3): 327-338.
[24] KIM H N. Haptic user interface design for students with visual impairments[C]//Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on computers and accessibility. New York: ACM, 2009: 267-268.
[25] HAN I, BLACK J B. Incorporating haptic feedback in simulation for learning physics[J]. Computers & education, 2011, 57(4): 2281-2290.
[26] LOOMIS J M, LEDERMAN S J. Tactual perception [J]. Hand-

book of perception & human performance, 1986, 2(2): 1－41.
[27] ERNST M O, BANKS M S. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion [J]. Nature, 2002, 415 (6870):429－433.
[28] 程黎, 顾定倩, 刘艳虹,等. 我国盲文使用状况的调查研究[J]. 语言文字应用, 2013 (2): 42－48.
[29] 王炎龙. 盲文出版困境及无障碍信息机制建设[J]. 中国出版, 2012 (2): 20－22.
[30] 师文, 朱学芳. 基于轮廓重构和特征点弦长的图像检索[J]. 软件学报, 2014 (7): 1557－1569.
[31] KOBAYASHI T, FUKUMORI M. Proposal of a design tool for tactile graphics with thermal sensation [C]//18th international conference on Virtual systems and multimedia. Pittsburgh: IEEE, 2012: 537－540.
[32] WU S, SUN X, WANG Q, et al. Tactile modeling and rendering image-textures based on electrovibration [J]. The visual computer, 2017, 33(5): 637－646.
[33] 李佳璐, 宋爱国, 张小瑞. 彩色图像的纹理力/触觉渲染方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(4): 719－724.
[34] RADIVOJEVIC Z, BEECHER P, BOWER C, et al. Electrotactile touch surface by using transparent graphene [C]// Proceedings of the 2012 virtual reality international conference. New York: ACM, 2012:1－3.
[35] FREDERIKS A D, KROSE B J A, HUISMAN G. Internet of touch: analysis and synthesis of touch across wearable and mobile devices[C]// ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing: adjunct. New York: ACM, 2016: 273－276.
[36] ZHANG X, REDON S, LEE M, et al. Continuous collision detection for articulated models using Taylor models and temporal culling [J]. ACM transactions on graphics, 2007, 26(3): Article No. 15. DOI:10.1145/1275808.1276396.
[37] ARGELAGUET F, ANDUJAR C. A survey of 3D object selection techniques for virtual environments [J]. Computers & graphics, 2013, 37(3): 121－136.
[38] FORD N. Cognitive styles and virtual environments [J]. Journal of the american society for information science, 2000, 51(6): 543－557.
[39] 程成, 赵东坡, 卢保安,等. 虚拟环境的用户意图捕获[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(2): 271－279.
[40] 祁彬斌, 朱学芳. 引入力触觉的数字文物多模交互方法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(8): 1218－1230.
[41] 王欣, 张丽锦. 干预训练对儿童掌握遗传知识的作用[J]. 心理科学进展, 2008, 16(5): 726－732.

作者贡献说明：

祁彬斌:提出研究思路,设计论文框架,设计实验,撰写论文并修改;

胡玉宁:讨论研究思路,收集部分文献,实验实施,提出修改建议;

朱学芳:提出选题方向,提出修改建议,参与修订论文;

朱庆华:提出修改意见,文字指导。

Construction and Usage of Haptic Interaction Services for Blind Reading

Qi Binbin Hu Yuning Zhu Xuefang Zhu Qinghua
School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract: [**Purpose/significance**] In the promotion process of the civil reading, it is of great social significance to meet the reading needs of visually impaired people and ensure their reading rights. With the advent of the Internet era, people's reading habits and interests begin to expand from traditional texts to diversified forms, such as words, images and graphics. [**Method/process**] In this paper, the related problems of blind reading are discussed and a novel tactile interaction framework for blind reading is presented. The tactile cognition and perceived characteristics is firstly analyzed and then a set of the key issues about blind reading are elucidated. By introducing a typical force feedback device to build a tactile interaction system, the experiment is comprised of two stages: the effectiveness of tactile reading and the comprehensibility of information resources at different levels. [**Result/conclusion**] Experimental results showed that the tactile interaction system has excellent performances in immersion, interactivity and feasibility. It is proved that there are differences in the difficulty of tactile reading and comprehensibility of information resources at different levels, and the rational introduction of cognitive training mechanism can effectively improve the operator's perception and recognition ability.

Keywords: digital information resources blind reading haptic interaction haptic object construction intervention training